

ÉTUDE
SUR LES
VARIATIONS DE DENSITÉ
DE
L'AIR ATMOSPHERIQUE

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

POUR OBTENIR LE

GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES

PAR

CHARLES BOREL

Licencié en Mathématiques
Assistant au Laboratoire de Physique



SADAG DE FRANCE, IMP., PARIS

—
1921

ÉTUDE
SUR LES
VARIATIONS DE DENSITÉ
DE
L'AIR ATMOSPHÉRIQUE

THESE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

POUR OBTENIR LE

GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES

PAR

CHARLES BOREL

Licencié en Mathématiques
Assistant au Laboratoire de Physique



SADAG DE FRANCE, IMP., PARIS

1921

A mon Père

Ces recherches ont été exécutées au Laboratoire de Physique de l'Université de Neuchâtel, sous la direction constante de Monsieur le professeur Jaquierod.

Je lui adresse ici l'expression de ma profonde gratitude pour ses nombreux conseils et pour tout le temps qu'il a consacré à cette étude.

Je remercie également la Direction de l'Aérodrome fédéral qui m'autorisa à utiliser des avions militaires pour exécuter de nombreuses prises d'air à différentes altitudes.

Enfin, je remercie aussi Monsieur H. Mügeli, assistant au Laboratoire de Physique, pour sa précieuse collaboration dans l'étalonnage de mes appareils.

C. B.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport de MM. les Professeurs JAQUEROD, BILLETER
et BERTHOUD, autorise l'impression de la présente thèse,
sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont
contenues.

Neuchâtel, Mai 1921.

LE DOYEN,
ARGAND.

ÉTUDE

SUR LES

VARIATIONS DE DENSITÉ DE L'AIR ATMOSPHÉRIQUE

INTRODUCTION. — Des variations de composition de l'air atmosphérique ont été observées par Morley (2)¹ en 1879. Au cours d'une longue série de déterminations, il constata que la teneur en oxygène n'est pas rigoureusement constante, et fit la remarque que les teneurs les plus faibles correspondent aux périodes de hautes pressions barométriques.

Rapprochant ce résultat de celui de Loomis (1) qui, en 1875, démontrait l'existence de courants descendants au centre d'un anticyclone, il en déduisait que la diminution dans la proportion d'oxygène pourrait être attribuée à cet apport d'air qui, provenant des hautes régions de l'atmosphère, devait être moins riche en oxygène que celui des niveaux inférieurs.

Dans leurs recherches sur les gaz, Leduc (13) et Lord Rayleigh (4) semblent n'avoir pas tenu compte de cette remarque, et n'ont vu, dans les écarts entre les diverses déterminations de la densité de l'air, que l'effet des erreurs d'expériences. Ce n'est qu'en 1910, que Ph.-A. Guye, Kovacs et Wourtsel (7) constatèrent que ces variations semblent systématiques, et conformes à la théorie de Loomis-Morley.

Ces premières constatations ont été confirmées depuis par Germann à Genève en 1912 (9), par Jaquerod en collaboration avec Przemyski à Neuchâtel en 1912 également², par Germann et Booth en 1916 à Cleveland (10). Les expériences de lord Rayleigh à Terling-Place, en 1893 (4) permettent de reconnaître des écarts analogues, ainsi que l'a fait ressortir Ph.-A. Guye. Ce dernier auteur a exposé le problème de façon très complète dans le *Journal de chimie physique*, en 1917 (12), ce qui nous dispensera d'y insister longuement.

L'amplitude des variations de densités constatées varie dans d'assez larges limites: les écarts extrêmes atteignent 2,2 dixièmes de mgr. à Terling Place, 6 à Genève et 9 à Neuchâtel. Notons à ce propos que ce serait un heureux hasard que de tomber, lors de mesures discontinues, sur un maximum ou sur un minimum absolu de densité. Les dernières observations citées (Neuchâtel) correspondent précisément à une période de pressions exceptionnellement élevées, suivie d'une chute rapide du baromètre.

¹ Les chiffres entre parenthèses correspondent à l'index bibliographique situé à la fin de ce mémoire.

² Observations dont le détail n'a pas été publié et qui sont reproduites dans le mémoire de Ph.-A. Guye (12), page 567.

Si l'on compare ces résultats avec ceux fournis par les très nombreuses analyses de l'air, on constate que les variations de composition observées ne suffisent pas à rendre compte des variations de densité. Les analyses de Morley et Benedict (2, 8) au Nutrition laboratory de Washington, qui sont les plus nombreuses, et ont été effectuées avec une précision minutieuse, accusent des variations extrêmes de 0,07 % d'oxygène en volume, ce qui correspondrait à une variation de densité de 0,6 dixième de mgr. par litre.

On peut calculer les changements de la teneur de l'air en un gaz plus lourd ou plus léger, susceptible de produire un changement donné dans la densité au moyen de la formule approchée donnée par Ph.-A. Guye (12, page 572), et conclure avec cet auteur que les variations de composition actuellement connues ne rendent pas complètement compte des variations de densités.

Il serait évidemment d'un grand intérêt de pouvoir conduire parallèlement deux séries d'observations, l'une portant sur l'analyse, l'autre sur la densité. Nous avons, dans le présent travail, cherché à réaliser des séries pratiquement continues de déterminations de densité, de façon à bien établir la loi de variation du poids spécifique, et avons d'autre part essayé la vérification de diverses hypothèses émises en vue d'expliquer les phénomènes. Nous n'étions pas outillés pour effectuer des analyses chimiques. Comme on le verra, l'explication que nous espérons trouver s'est dérobée, tous les essais faits jusqu'ici ayant fourni des résultats négatifs. La question reste donc posée.

L'hypothèse de Morley, qui admet l'appel de gaz, moyennement plus léger que l'air des basses régions, et provenant des hautes couches atmosphériques lors d'un régime anticyclonique, suppose que ce gaz est enrichi en constituants légers (azote surtout) par l'établissement de l'équilibre conforme aux lois du mélange des gaz. Remarquons que cette explication se heurte d'emblée à certaines objections. L'air de la troposphère est brassé de façon énergique par les courants atmosphériques, et il est très peu probable que l'équilibre, correspondant à la répartition en altitude des constituants suivant leurs poids moléculaires, puisse s'établir de façon même approchée. Les calculs de Gouy (16) ont montré que cet équilibre ne serait atteint qu'au bout d'un temps très long.

Nous avons néanmoins examiné la possibilité de l'existence d'un gaz très léger, et encore inconnu, contenu dans les hautes régions de l'atmosphère.

Une deuxième hypothèse, émise par Ph.-A. Guye (12), consiste à admettre la présence de poussières ultramicroscopiques qui ne seraient pas arrêtées par les filtres de coton, et se comporteraient comme un gaz de poids atomique élevé. La présence de poussières visibles est bien connue; on en a dénombré plus de 100.000 par cm^3 dans l'air des grandes villes, 200 seulement au sommet du Righi; leur nombre diminue rapidement lorsqu'on s'élève au-dessus du niveau du sol. Mais il est possible que les filtres de coton laissent passer des poussières beaucoup plus petites, non visibles à l'ultra-microscope. Il suffirait en effet, pour que les poussières, pesant dix mille fois plus qu'un atome d'hydrogène, changent la densité de l'air de 0,0001 gr., d'une teneur de 0,00002 % en volume.

Il faut cependant remarquer que cette proportion correspondrait à un nombre de particules par cc. de l'ordre de 10^7 , ce qui est considérable. Il semble bien que leur présence pourrait être reconnue par certains phénomènes optiques; de plus, l'air privé de poussières par passage à travers un filtre d'ouate ne provoque plus la formation de brouillard par détente, ce qui semble exclure la présence d'un nombre aussi considérable de centres de condensation.

Nous avons néanmoins élaboré une méthode de dépoussiérage électrique et commencé des recherches dans cette voie; par suite de difficultés d'ordre pratique, elles ne sont pas encore achevées.

Il nous semble enfin qu'une troisième hypothèse pourrait être avancée, consistant à admettre que les maxima de densité sont dus à la présence momentanée de gaz plus lourds que l'air; ces gaz seraient par exemple extraits du sol lors des régimes de basse pression. Il est difficile de comprendre comment la présence de ces gaz aurait pu échapper jusqu'ici à l'observation; elle aurait dû être décelée, semble-t-il, par le fonctionnement des machines employées par la liquéfaction de l'air. De plus, il faudrait admettre, dans cette hypothèse, que ces gaz lourds sont rapidement détruits par l'action de la lumière ou par oxydation, sans quoi, leur proportion allant en augmentant, provoquerait une augmentation constante de la densité de l'air, qui n'est pas observée.

Les essais faits pour vérifier cette hypothèse ont donné jusqu'ici des résultats négatifs; nous ne l'avons émise, et n'avons cherché à la vérifier qu'en désespoir de cause, devant l'impuissance où nous nous trouvions de résoudre le problème.

Si aucune des explications proposées ne devait, en fin de compte, fournir la solution de la question, on serait amené à se demander si les variations de densité observées ne pourraient pas être apparentes, et leur cause cherchée dans des erreurs systématiques des appareils employés aux mesures.

Il va sans dire que c'est la première supposition que nous ayons examinée; et si nous l'avons écartée, c'est après l'avoir successivement envisagée sous toutes ses faces. Nous ne pouvons voir ni dans le fonctionnement de la balance (condensation de gaz, influences thermiques ou électriques) ni dans celui du baromètre ou du thermomètre à résistance, une cause d'erreur susceptible de fausser les déterminations de densités dans le sens obtenu.

Il est clair qu'une possibilité a pu nous échapper; cela paraît cependant improbable si l'on songe d'une part que des résultats semblables ont été obtenus ailleurs, en utilisant des méthodes expérimentales très différentes, et que d'autre part nous n'avions à enregistrer que des *variations* de densités et non des densités absolues, ce qui diminue considérablement l'influence des erreurs systématiques pouvant agir sur le résultat.

PRINCIPE DE LA MÉTHODE. — Presque toutes les déterminations de densité de l'air ont été faites jusqu'ici par la méthode du ballon. Nous avons utilisé au contraire la méthode hydrostatique — ou plus exactement aérostatique — déjà étudiée dans ce laboratoire (5). Outre les avantages déjà relevés dans le travail de Jaquerod et Tourpaïan, elle présente, pour le cas qui nous occupe, la précieuse faculté de permettre l'enregistrement pratiquement continu des variations de densité. De plus, si la construction et la mise au point de l'appareil sont assez longues et délicates, la mesure proprement dite n'exige plus, dans la suite, qu'un quart d'heure environ.

Nous avons repris l'appareil déjà décrit (5) en le perfectionnant et l'adaptant au genre spécial de recherches que nous avions en vue. La précision que nous désirions atteindre est de quelques cent millièmes sur la densité de l'air, précision nécessaire pour mettre en évidence les faibles variations (les grandes variations atteignent comme on le verra plusieurs dix millièmes). Il était donc nécessaire de déterminer avec la même précision les divers facteurs dont est fonction la densité, c'est à dire que nous devons obtenir la poussée hydrostatique à 1-2 centièmes de mgr. (volume du flotteur 500 cc.), la pression barométrique à 1-2 centièmes de millimètres de mercure, et la température au centième de degré.

Nous n'avons pas cherché à faire de détermination absolue de la densité de l'air, qui nous eût été d'ailleurs inutile. Nous nous sommes bornés à prendre comme base de nos calculs la densité 1,2928 gr./litre ou poids du litre normal, et avons rapporté toutes nos mesures à celle du 23 juillet 1919, qui correspondait à une pression très voisine de la moyenne barométrique (722,5 mm.).

— L'appareil complet est représenté par la *fig. 1*. Il comprend tout d'abord une pompe P, dont le fonctionnement est facile à saisir, actionnée de façon continue, jour et nuit, par un moteur électrique. Elle aspire l'air extérieur par un orifice O, percé à 1 m. 20 au-dessus du sol, à travers un tube T_1 rempli d'ouate, et le refoule dans le récipient F_1 qui contient le flotteur f , après l'avoir fait traverser deux tubes

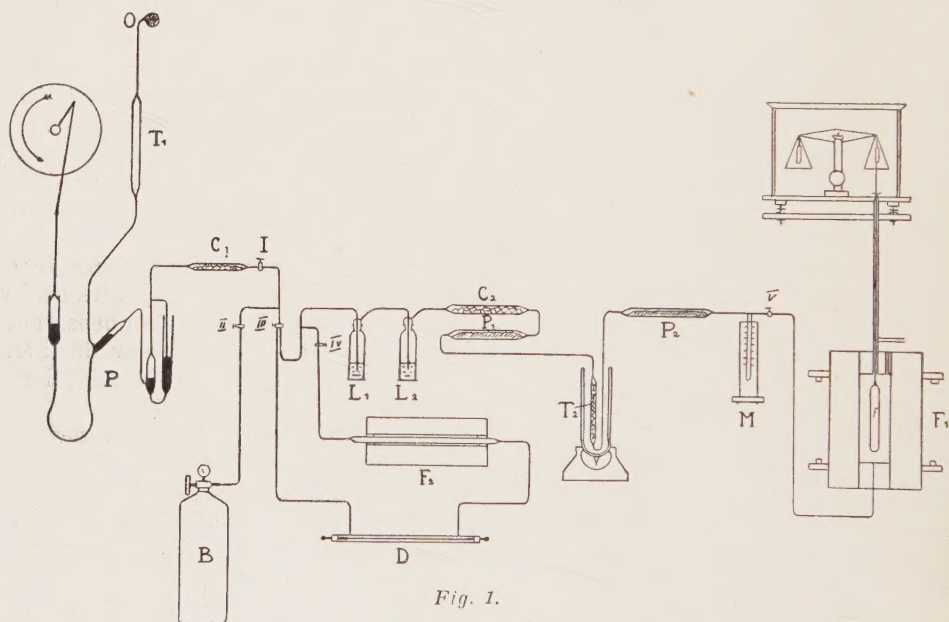


Fig. 1.

à CaCl_2 , C_1 et C_2 , deux flacons laveurs à potasse caustique L_1 L_2 , deux tubes à P_2O_5 , P_1 et P_2 et divers autres appareils décrits plus loin. Le robinet I permet de régler le débit, et les robinets II, III et IV permettent d'étudier l'air capté en avion, ou en des lieux éloignés du laboratoire, et renfermé dans la bombe B, ou de faire passer l'air au travers d'un appareil D F_2 destiné à retenir les poussières qui auraient pu échapper à l'ouate (hypothèse de M. Guye, voir plus haut).

Ce dernier appareil se compose d'un dépoussiéreur électrique D et d'un four F_2 qui détruit l'ozone formé par l'effluve du dépoussiéreur.

L'air capté en avion est introduit dans l'appareil par le robinet II. Pour cette étude, il faut arrêter la pompe, fermer le robinet I et relier la bombe B contenant l'air capté au robinet II.

Enfin, T_2 représente un tube contenant des perles de verre que nous avons utilisées pour étudier la présence d'un gaz lourd dans l'air. Il plonge dans un Dewar contenant de l'acide carbonique solide ou de l'air liquide. Pour ne pas compliquer le schéma ci-contre, nous n'avons représenté ni le baromètre, ni le thermomètre à résis-

tance qui, ainsi que la balance, font l'objet de chapitres spéciaux. Nous allons maintenant étudier la mise au point et la construction des différentes parties de l'appareil que nous venons de décrire.

MESURE DE LA POUSSÉE. — L'appareil (*fig. 1*), se compose d'un cylindre de silice *f*, suspendu par un fil de platine à l'un des plateaux d'une balance. Sur l'autre plateau, un cylindre de verre rempli de plomb lui fait équilibre. La poussée de l'air sur ce cylindre est annulée par celle sur un cylindre de même volume, placé sur le premier plateau. Le flotteur de silice dont le volume est d'environ 500 cm³ oscille dans un cylindre de laiton protégé thermiquement par une isolation de cendre de bois et d'amiante de 10 cm. environ d'épaisseur. On réalise ainsi une température aussi uniforme et constante que possible; du reste, s'il y avait un gradient de température dans l'air à étudier, le thermomètre à résistance mesurerait la température moyenne puisqu'il est de même longueur que le flotteur. L'air chassé par la pompe est introduit dans le cylindre de laiton par la partie inférieure; il s'en échappe par la partie supérieure dans le tube de verre qui protège le fil de suspension du flotteur; de là il est aspiré par une trompe à eau pour éviter les perturbations qui pourraient se produire dans la cage de la balance remplie d'air ordinaire, par l'arrivée d'air sec. Les variations de pression, de température de l'air produisent des variations de poussée sur le flotteur et détruisent l'équilibre de la balance. Il est rétabli au moyen de petits poids en aluminium de 3 mgr. environ chacun, placés sur l'un ou l'autre des plateaux de la balance. Il est déterminé sur une échelle millimétrique par la méthode de Poggendorf. Nous avons constaté qu'en arrêtant la balance plusieurs fois de suite la position d'arrêt était la même à moins d'un dixième de division de l'échelle graduée. D'un jour à l'autre, cette position varie de moins d'un dixième de division également, à cause des petites déformations du support en bois de la lunette. C'est cette position que nous avons prise comme zéro de la balance.

Il faut connaître la sensibilité de la balance; comme la position d'équilibre varie constamment, nous avons procédé de la façon suivante : nous avons déterminé, en alternant les mesures, une série de positions d'équilibre de la balance en chargeant différemment les plateaux. Puis, nous avons porté ces résultats sur un graphique exprimant la position d'équilibre en fonction du temps; nous obtenons deux séries de points que nous relient chacune par une courbe; il suffit alors de mesurer les différences d'ordonnées des deux courbes pour avoir par une simple division la sensibilité de la balance. Deux séries de déterminations nous ont donné comme valeur moyenne de la sensibilité 42,9 divisions par mgr. (précision 1 %).

La poussée subie par le flotteur se compose d'une poussée statique et d'une poussée dynamique produite par l'arrivée de l'air sur la partie inférieure du flotteur et par frottement sur ses parois et sur le fil de suspension. La poussée dynamique dépend évidemment du débit qu'il nous fallait tout d'abord déterminer. Pour cela nous avons construit un petit manomètre composé d'un tube en U contenant de l'huile de vaseline et branché sur la canalisation en dérivation aux extrémités d'un tube capillaire. Un étalonnage nous a permis d'exprimer le débit en fonction de la dénivellation du manomètre; puis nous avons déterminé les variations de la position d'équilibre de la balance B, provenant des variations de débit D. Cette variation indiquée par le tableau suivant, est à peu près linéaire.

D	12,0	24,5	32,0	div. du manomètre
B	4,0	8,6	11,0	div. de l'échelle

Un graphique permet alors de ramener toutes les pesées à un débit constant que nous avons choisi égal à 2 litres par heure, correspondant à une dénivellation de 24 mm. du manomètre à huile.

MESURE DE LA PRESSION. — Comme nous l'avons déjà dit, il est nécessaire de connaître la pression atmosphérique avec une précision de quelques cent millièmes, soit de 1 ou 2 centièmes de millimètre de mercure. Pour cela, nous avons choisi l'eau comme liquide barométrique. Sa densité étant environ 13,5 fois plus faible que celle

du mercure, un pointage au dixième de millimètre, facilement réalisable, donne la pression avec la précision voulue. Comme il était impossible de construire un baromètre à eau, nous avons réalisé un baromètre où la pression atmosphérique est équilibrée par une colonne de mercure de hauteur constante et par une colonne d'eau de hauteur réglable. L'appareil est représenté schématiquement par la *fig. 2*.

La partie A de l'appareil n'est autre chose qu'un baromètre ordinaire dont *a* serait la chambre, *b* la cuve. A l'intérieur de la chambre, nous avons soudé une petite pointe de verre bleu recourbée vers le bas, *c*. La partie B est composée d'un tube en T, *d*, soudé à la cuve et muni d'un robinet *r*, d'un tube *e*, ouvert à sa partie supérieure et d'une ampoule de verre de 350 cm³ environ reliée à l'appareil par l'intermédiaire d'un tuyau de caoutchouc et d'un robinet *r*. Une échelle divisée E permet de repérer la position d'un curseur qui peut glisser sur le tube *e*. L'ampoule, dans la position C, ainsi que la cuve barométrique, sont remplies d'eau. Si l'on place l'ampoule dans la position D, le robinet *r* étant ouvert, l'eau de l'ampoule s'écoule dans le tube *e*; elle fait monter le ménisque de mercure supérieur dans la chambre barométrique. Si au moment où il arrive en contact avec la pointe de verre coloré, on ferme le robinet, et si l'on exprime l'équilibre ainsi

réalisé entre la pression atmosphérique P, la colonne de mercure de hauteur H, et la colonne d'eau de hauteur *h*, on aura, en appelant S₀ et S_t les densités du mercure à 0° et à la température de la mesure, s_t celle de l'eau :

$$P = H \frac{S_t}{S_0} - h \frac{s_t}{S_0}$$

La hauteur H est une fonction de la température qui peut s'exprimer par la formule

$$H = H_0 - \frac{V_0 (\Delta - \alpha) t}{\sigma}$$

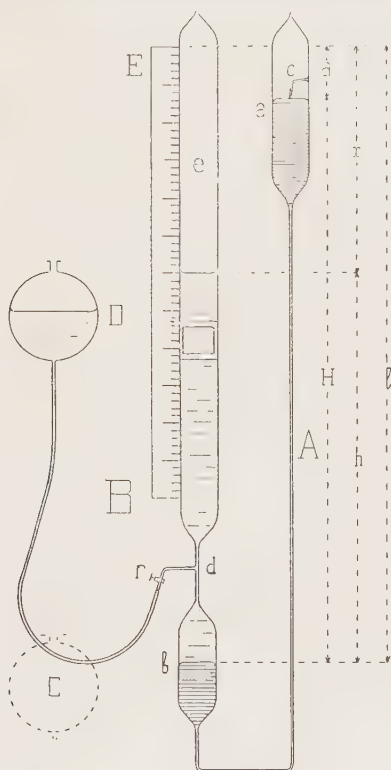


Fig. 2.

où H_0 représente la valeur de H pour $t = 0^\circ$, V le volume du mercure à 0° , Δ et α les coefficients de dilatation du mercure et du verre, σ la section de la cuve barométrique. On peut écrire en outre d'après la *fig. 2*.

$$h = l - x = a + H - x \quad \text{III}$$

Enfin,
$$\frac{S_t}{S_0} = \frac{1}{1 + \Delta t} \quad \text{IV}$$

remplaçons dans I

$$P = \left[H_0 - \frac{V_0 (\Delta - \alpha) t}{\sigma} \right] \frac{1}{1 + \Delta t} - \left[a + H - x \right] \frac{S_t}{S_0} \quad \text{V}$$

En considérant t comme un paramètre, P devient une fonction linéaire de x puisque H , qui se trouve dans la seconde parenthèse, et que nous n'avons pas explicité, est une fonction de t . D'après l'équation III et d'après la figure on voit que x représente la distance du ménisque d'eau du baromètre à la partie supérieure de l'échelle divisée E. La détermination de cette longueur et celle de la température donneront la pression barométrique par application de la formule V.

La détermination des constantes de la formule V a été soigneusement effectuée par des pesées et des mesures au cathétomètre.

Nous avons cherché ensuite la manière la plus pratique d'utiliser cette formule, et nous avons reconnu la simplicité du procédé suivant :

Exprimer graphiquement pour une valeur de t choisie convenablement t_1 , P en fonction de x et dresser des tables exprimant la correction qu'il faut apporter au résultat fourni par le graphique lorsque la température est différente de t_1 , que, pour la commodité des corrections, nous avons choisie égale à 22° .

L'équilibre du baromètre est établi lorsque la pointe de verre bleu de la chambre barométrique entre en contact avec son image dans le ménisque de mercure. On arrive facilement par ce procédé à une précision de 1 ou 2 centièmes de millimètre comme le montrent les mesures répétées plusieurs fois dans un court intervalle de temps lorsque la pression est stable. Il faut éviter les mouvements oscillatoires de la colonne de mercure qui se produisent toujours lorsque l'eau est introduite rapidement dans le tube c . Pour cela, il est nécessaire de remplir tout d'abord le tube e , en ouvrant le robinet r jusqu'à ce que le ménisque de mercure soit à un demi-millimètre environ de la pointe de verre. On attend ensuite quelques instants afin que les mouvements du mercure s'amortissent, puis on laisse entrer l'eau très lentement jusqu'à ce que la pointe entre en contact avec son image. On ferme le robinet et l'on pointe le ménisque d'eau avec le curseur glissant sur l'échelle E. La température se détermine au moyen des lectures faites à deux thermomètres placés le long de la colonne de mercure.

Remarquons en outre qu'au moment de la mesure, le volume de la chambre barométrique est constant, ce qui élimine les erreurs dues à l'inégale compression des traces de gaz que pourrait contenir l'appareil; l'effet de la température seule serait sensible. Ajoutons enfin, qu'avant de sceller la chambre barométrique, nous avons fait bouillir le mercure pendant plusieurs heures, de sorte que la pression au-dessus du mercure doit être excessivement faible. Nous avons comparé notre appareil à un baromètre ordinaire à mercure donnant le dixième de millimètre et avons trouvé une différence constante sans aucune erreur systématique.

MESURE DE LA TEMPÉRATURE. — La mesure de la température doit se faire avec une précision de quelques cent millièmes sur la température absolue soit d'un centième de degré. Nous avons renoncé à l'emploi d'un thermomètre à mercure à cause de l'incertitude de la correction due à la colonne émergente et nous avons mis au point un thermomètre à résistance.

Nous avons construit notre appareil en enroulant simultanément sur un tube de verre de 6-7 mm. de diamètre un fil de nickel de 30 ohms environ préalablement étudié et un fil de soie pour isoler les spires les unes des autres. Les extrémités du fil de nickel sont soudées à un gros fil de cuivre de 4 mm. de diamètre et à un cylindre de cuivre qui sont reliés à deux bornes, placées sur une plaque de fibre; un tube de verre protège le fil de nickel.

Pour étalonner ce thermomètre nous avons déterminé sa résistance à la température de la glace fondante, à celle de l'eau bouillante et à deux températures intermédiaires, vers 16° et 28°. Pour ces derniers points nous nous sommes servis d'un thermomètre Baudin très bien connu.

Nous avons trouvé :

$$\begin{array}{llll} \text{à } 0^{\circ} & : & 29,527 \text{ ohms;} & \text{à } 16^{\circ},03 : & 31,416 \text{ ohms;} \\ \text{à } 27^{\circ},475 & : & 32,475 \text{ ohms;} & \text{à } 98^{\circ},42 : & 42,753 \text{ ohms.} \end{array}$$

Pour terminer l'étalonnage, il restait à exprimer les variations de résistance du thermomètre en fonction de la température par une expression aussi simple que possible et donnant la précision exigée de 0°,01. Nous avons choisi une équation du deuxième degré de la forme :

$$t = a (R - R_0) + b (R - R_0)^2 \quad (I)$$

et avons déterminé la valeur des coefficients a et b pour que la courbe correspondante passe le mieux possible par les points expérimentaux.

Nous avons constaté que la formule :

$$t = 8,404 (R - 29,527) - 0,0728 (R - 29,527)^2 \quad (II)$$

correspond aux valeurs ($R = 29,527$; $t = 0$) et ($R = 42,753$; $t = 98,42$) et donne une erreur de $- 0^{\circ},009$ au point expérimental ($R = 31,416$; $t = 16,03$) et de $+ 0^{\circ},019$ au point ($R = 32,897$; $t = 27,475$). Comme toutes nos mesures se font entre 10 et 23°, la formule (II) remplit donc les conditions que nous lui avons imposées.

Nous avons alors construit un pont de Wheatstone, dans une des branches duquel était placé notre thermomètre. Nous disposions d'un fil de constantan de 2 mm. de diamètre enroulé en hélice sur un cylindre de bois, sur lequel roulait un curseur actionné par un tambour divisé en 100 parties et pour la construction des résistances de comparaison d'un fil de manganine préalablement étudié au point de vue de sa résistivité et de son coefficient de température.

Nous avons calculé et construit deux résistances permettant de mesurer des températures comprises entre 0° et 24°. Une troisième résistance permettra de mesurer des températures dans le voisinage de 50°, afin d'étudier le coefficient de dilatation de l'air¹.

¹ Cette dernière étude n'est pas encore faite.

Enfin, nous avons prolongé le fil hélicoïdal du pont par deux résistances de $84\ \Omega$ environ pour obtenir la sensibilité désirée, soit un centième de degré environ par division du tambour.

Pour l'étalonnage, il suffit dès lors de remplacer dans l'appareil précédent le thermomètre en nickel par une boîte de résistance et de déterminer la position d'équilibre du curseur pour différentes résistances réalisées sur la boîte. La formule II permet de déterminer la température correspondante; enfin, nous avons exprimé la température en fonction de la graduation du tambour et pour l'utilisation courante de l'appareil, nous avons traduit ces résultats graphiquement.

Connaissant le coefficient de température du fil de manganine des résistances et la sensibilité du pont, on calcule facilement le déplacement de la position du curseur produit par les petites variations de la résistance de comparaison. Ce déplacement est d'environ 1,9 divisions par degré; la correction correspondante a toujours été faite.

Après une année de fonctionnement, nous avons retiré le thermomètre du four et l'avons placé dans la glace fondante en déterminant la position d'équilibre du pont. Il s'est trouvé réalisé à la division 75,9 tandis qu'il était à 76,1 lors de l'étalonnage. La différence est de 2 millièmes de degré. Nous avons ensuite placé notre thermomètre dans une cuve remplie d'eau où plongeait le « Baudin » N° 7563. Nous avons trouvé : des écarts inférieurs au centième de degré pour des températures de $10^{\circ},03$, $11^{\circ},74$ et $12^{\circ},70$.

DÉTERMINATION DES MEILLEURES CONDITIONS DE MESURE. — L'heure à laquelle la mesure de la densité de l'air est faite n'est pas indifférente. Le tube protecteur en verre qui entoure le thermomètre à résistance l'isole thermiquement de l'air à étudier, de sorte qu'il fonctionne avec un léger retard; il donne des indications trop basses lorsque la température monte, et vice-versa. Il faut donc, premièrement atténuer autant que possible la variation diurne de température de l'air à étudier, deuxièmement, faire les mesures lors d'un maximum ou d'un minimum de température. La première condition est réalisée par l'isolement d'amiante et de cendres entourant le cylindre où oscille le flotteur. L'amplitude diurne maximum étant de 7 à 8 dixièmes de degré en été par une journée chaude; elle est de $1^{\circ},5$ environ en hiver lorsque le chauffage du laboratoire est en action. Nous avons réduit cette dernière amplitude à 4-5 dixièmes de degré en réduisant notablement le chauffage. L'augmentation maximum de température par heure était de 5-6 centièmes de degré en été, de 7-8 en hiver; nous avons réduit cette dernière à 4 centièmes de degré par heure.

Le retard du thermomètre ne dépasse pas quelques centièmes de degré; il est probablement inférieur au millième de degré lors d'un maximum ou d'un minimum de température. L'heure de ces extrêmes varie en général d'un jour à l'autre et l'on peut définir des « types de journées » pour lesquels ils se produisent approximativement aux mêmes heures. On peut distinguer à ce point de vue :

1. *Les jours d'été clairs.* — La température de l'air passe par un maximum vers 22 h., et par un minimum vers midi; ce minimum se produit plus tôt, vers 11 h. ou même vers 10 h. 30 à la fin de l'été, ainsi que par des journées très chaudes.

2. *Les jours d'hiver.* — L'effet du chauffage réduit est de retarder le minimum du matin qui se produit vers 8 h. 30 et d'avancer le maximum du soir à 17 h. Avec l'ancien mode de chauffage, le minimum avait lieu vers 6 h. et le maximum dans l'après-midi entre 13 h. 30 et 14 h. 30.

3. *Les jours de printemps et d'automne.* — Le chauffage ne fonctionnant pas et l'amplitude extérieure diurne étant faible, celle de l'air dans l'appareil est à peine de 1 dixième de degré. Dans ces conditions, les mesures peuvent se faire à n'importe quel moment de la journée.

4. *Les jours d'été couverts* sont dans le même cas que les précédents.

— Pour que la précision des mesures soit de quelques cent millièmes, il faut encore que la pression atmosphérique soit aussi stable que possible. Nous avons souvent constaté des variations de pression inférieures à 1 ou 2 centièmes de millimètre de mercure en 10 minutes (temps nécessaire pour une détermination de densité de l'air), ce qui correspond à de très bonnes conditions de mesure. Mais s'il se produit des sautes brusques de pression (nous en avons constaté de plusieurs dixièmes de millimètre en 10 minutes), il est clair que la précision n'est plus celle que nos recherches réclament.

— La mesure de la poussée n'exige pas la réalisation de conditions spéciales.

DÉTERMINATION ET CALCUL DE LA DENSITÉ DE L'AIR — VÉRIFICATION DE L'APPAREIL. — Chaque détermination de densité comprend trois mesures de la pression, deux mesures de la température, et deux mesures de la poussée qui se font dans l'ordre suivant :

Pression, température, poussée, pression, poussée, température, pression.

Elle comprend en outre deux lectures au manomètre indiquant le débit, l'une avant la première mesure à la balance, l'autre après la deuxième, et deux déterminations du zéro de la balance faites au début et à la fin de la mesure, l'indication des poids placés sur l'un des plateaux de la balance — celle de la date et de l'heure de la mesure. Enfin, des indications météorologiques la complètent.

Appelons P la pression moyenne de l'air à étudier, T sa température¹, E la position d'équilibre de la balance et Z son zéro, V le volume du flotteur, $+p$ la somme des poids placés sur le plateau droit de la balance (— p , quand ils sont à gauche), σ la sensibilité de la balance, S le poids du litre d'air, π le poids du flotteur dans le vide. L'équation traduisant l'équilibre de la balance sera :

$$\pi - VS + p + \frac{E - Z}{\sigma} = K$$

K étant une constante. Soit, A étant une autre constante :

$$VS - p - \frac{E - Z}{\sigma} = A$$

d'où l'on tire :

$$S = \left(A + p + \frac{E - Z}{\sigma} \right) \frac{1}{V} \quad \text{I}$$

en outre, en désignant par S_{0-760} le poids du litre d'air à 0° et sous la pression de 760 mm. Hg, on peut poser :

$$S_{0-760} = S \frac{760}{272,3311} \frac{T}{P} \quad \text{II}$$

¹ $T = t \times \frac{1}{\alpha}$; t représente la température centigrade ; α le coefficient de dilatation de l'air ;
 $\frac{1}{272,3311}$

en combinant I et II on tire en définitive :

$$S_{0-760} = A + p + \frac{E - Z}{\sigma} \frac{760}{272,3311} \frac{T}{P V} \quad \text{III}$$

La détermination directe de la constante A serait nécessaire pour la mesure des valeurs absolues de la densité de l'air; mais nos recherches ne portent que sur les *variations de densité*. Nous avons alors exécuté une détermination de densité lorsque la pression était voisine de la moyenne : 722,50 mm. (23-VII-19) et avons admis comme valeur de la densité ce jour-là : 1,29280. La formule III permet alors de déterminer la constante A.

Au résultat brut fourni par la formule précédente, deux corrections doivent être apportées : la première provient du fait que pour nos calculs, nous avons employé l'équation des gaz parfaits; la correction exprimera donc les écarts de compressibilité de l'air avec celle définie par les lois des gaz parfaits; elle est de l'ordre de quelques centièmes de mg. En outre, le ménisque d'eau du baromètre n'étant pas au même niveau que le centre du flotteur de silice, la pression lue au baromètre n'est pas rigoureusement la pression moyenne de l'air à étudier. En repérant la position du centre du flotteur sur l'échelle du baromètre, on détermine cette correction en sachant qu'une variation de hauteur de 1 cm. dans l'air produit une variation de pression de 0,01 mm. Hg.

LES MESURES DE VÉRIFICATION ont été faites au moyen des bombes décrites plus haut. La densité de l'air pris à l'extérieur a été déterminée comme il a été dit précédemment, et au moment de cette première mesure, nous avons rempli une des bombes à 3 atm. environ. Puis, le lendemain, nous avons laissé l'air de la bombe s'échapper dans l'appareil et déterminé sa densité. Quatre mesures de contrôle ont donné comme différence :

Densité de l'air extérieur — Densité de l'air de la bombe :

$$- 0,05 - 0,01 + 0,05 + 0,06 \text{ mgr.}$$

Nous avons répété ces premières mesures de vérification en remplissant d'air deux bombes paraffinées, lors d'une détermination de densité, et en procédant de façon analogue. Les bombes se vidaient en deux jours au cours desquels nous avons exécuté des mesures de densité résumées dans le tableau ¹ suivant :

			Δs	Δh
7 IV 21	9 ²⁰	Air extérieur	— 0,14 mgr	— 0,88 mm
7 IV 21	18 ²⁰	1 ^{re} bombe	— 0,24	— 0,65
8 IV 21	17 ⁴⁵	2 ^e bombe	— 0,22	— 1,60
11 IV 21	9 ²⁵	Air extérieur	— 0,05	+ 3,04 mm
11 IV 21	17 ³⁰	1 ^{re} bombe	— 0,13	+ 0,51
12 IV 21	17 ²⁰	2 ^e bombe	— 0,03	+ 1,58

Ces mesures de contrôle indiquent que notre appareil donne une précision suffisante pour déceler les variations de densité de l'air qui font l'objet de cette recherche. Nous n'avons malheureusement pas eu au cours de ces dernières mesures de fortes variations de pression qui auraient rendu le contrôle plus probant.

¹ Δs et Δh représentent les différences de densité et de pression avec la moyenne (Voir paragraphe suivant).

RÈGLE DE LOOMIS-MORLEY. — Nous avons transcrit dans ce chapitre les premiers résultats de nos recherches. Il s'agissait de vérifier si les variations de densité de l'air dans nos régions obéissent à la règle de Loomis-Morley. Nous avons exécuté 160 déterminations de densité de l'air, pendant deux ans environ, réparties en séries de 2-30 mesures successives à raison d'une par jour. Elles ont été faites à tous les moments de l'année et montrent d'une façon indubitable que les variations de densité de l'air dans nos régions suivent la règle émise par le physicien américain.

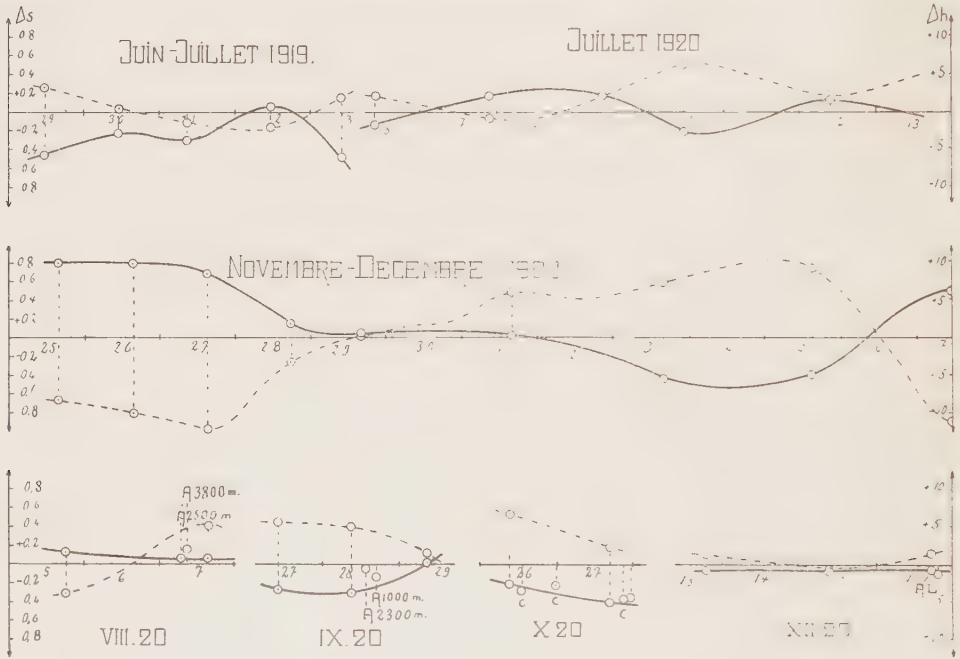


Fig. 3.

Le tableau 1 résume nos mesures dont quelques-unes sont transcrites graphiquement dans la fig. 3. Ils montrent que les variations de densité ne sont pas proportionnelles et de sign. contraire aux variations de pression: il en ressort également qu'à pression égale, la densité peut différer de plusieurs dixièmes de mgr. Ils indiquent avec évidence par contre que les maxima de pression correspondent à des minima de densité, et inversement.

Il y a quelquefois un retard de quelques heures entre les extrêmes de densité et les extrêmes de pression; mais en général, ces extrêmes se produisent simultanément. La courbe tracée en trait plein exprime les différences en mgr. Δs de la densité de l'air avec celle du 23 VII 19¹. La courbe tracée en pointillé représente la différence en mm. de Hg Δh entre la pression au moment de la mesure et celle du 23 VII 19, à 11 h. ²⁰: 722,50 mm. (Pression voisine de la moyenne pour Neuchâtel).

¹ La valeur — 0,20 mgr., indiquée dans le tableau, provient d'une correction que nous avons oublié d'apporter lors de nos premiers calculs.

N ^{os}	DATES	Δs	Δh	N ^{os}	DATES	Δs	Δh
1919				56	7 v 10 ⁴⁵	— 0,19	+ 5,08
1	28 VI 11 ³⁵	— 0,46	+ 7,69	57	8 v 10 ⁴⁵	— 0,22	+ 5,05
2	29 VI 11 ¹⁰	— 0,46	+ 3,66	58	9 v 11 ⁴⁰	— 0,12	+ 4,74
3	30 VI 11 ¹⁵	— 0,21	+ 0,39	59	10 v 9 ¹⁰	— 0,17	+ 6,33
4	1 VII 8 ⁵⁰	— 0,26	— 1,35	60	11 v 9 ¹⁵	— 0,24	+ 4,34
5	2 VII 11 ³⁵	+ 0,05	— 2,03	61	12 v 9 ³⁵	— 0,24	+ 2,27
6	3 VII 10 ²⁰	— 0,48	+ 1,88	62	15 v 10 ⁰⁰	— 0,16	+ 3,18
7	23 VII 11 ²⁰	— 0,20	0,00	63	18 v 10 ³⁵	— 0,15	+ 2,05
8	26 VII 8 ⁴⁵	— 0,08	+ 3,77	64	19 v 10 ²⁵	— 0,19	+ 2,76
9	28 VII 9 ¹⁰	— 0,02	+ 1,65	65	20 v 9 ⁵⁵	— 0,19	+ 2,59
10	29 VII 9 ⁴⁰	0,00	+ 0,89	66	21 v 10 ⁵⁰	— 0,33	+ 4,37
11	30 VII 9 ⁰⁰	— 0,05	+ 1,12	67	23 v 10 ¹⁵	— 0,27	+ 4,36
12	4 VIII 20 ³⁵	— 0,30	+ 2,74	68	25 v 9 ¹⁰	— 0,13	+ 2,66
13	5 VIII 20 ³⁰	— 0,37	+ 0,62	69	26 v 10 ²⁵	— 0,13	+ 4,65
14	18 VIII 9 ¹⁵	— 0,57	+ 8,63	70	27 v 8 ⁵⁵	— 0,06	+ 3,50
15	20 VIII 13 ⁵⁰	— 0,64	+ 3,35	71	28 v 10 ⁵⁵	— 0,14	+ 2,02
16	21 VIII 8 ²⁰	— 0,44	+ 3,10	72	29 v 8 ⁵⁵	— 0,37	+ 1,25
17	22 VIII 8 ⁵⁵	— 0,43	+ 5,82	73	30 v 11 ⁰⁵	— 0,41	+ 4,59
18	23 VIII 13 ⁰⁰	— 0,42	+ 5,95	74	31 v 9 ³⁰	— 0,26	+ 6,18
19	30 VIII 11 ⁴⁰	— 0,33	+ 2,45	75	1 VI 10 ¹⁰	— 0,23	+ 8,17
20	1 IX 10 ²⁰	— 0,01	+ 2,93	76	2 VI 9 ⁵⁵	— 0,20	+ 4,80
21	2 IX 13 ⁴⁵	— 0,05	+ 0,70	77	3 VI 10 ¹⁵	— 0,09	+ 1,79
22	4 IX 9 ⁴⁰	+ 0,14	+ 3,27	78	4 VI 10 ⁰⁰	— 0,19	— 1,63
23	5 IX 12 ⁰⁰	— 0,04	+ 5,47	79	5 VI 9 ⁵⁰	— 0,33	+ 2,31
24	6 IX 10 ¹⁰	— 0,07	+ 4,97	80	6 VI 10 ⁵⁵	— 0,20	— 1,64
25	7 IX 10 ⁴⁰	— 0,09	+ 5,42	81	7 VI 9 ⁵⁰	— 0,22	— 2,00
26	8 IX 8 ³⁵	+ 0,11	+ 7,67	82	10 VI 11 ⁴⁵	— 0,31	+ 0,46
27	9 IX 12 ¹⁰	— 0,02	+ 8,82	83	11 VI 10 ⁴⁵	— 0,19	+ 0,03
28	11 IX 14 ⁰⁰	— 0,40	+ 8,40	84	14 VI 11 ⁴⁰	— 0,31	+ 0,91
29	12 IX 15 ⁰⁵	— 0,32	+ 4,31	85	15 VI 9 ⁵⁰	0,00	— 1,02
30	10 XI 15 ²⁰	+ 0,36	— 7,85	86	16 VI 10 ⁰⁵	+ 0,17	— 0,62
31	11 XI 15 ³⁵	+ 0,67	— 7,13	87	17 VI 9 ⁴⁰	0,00	— 0,66
32	12 XI 14 ⁵⁰	+ 0,35	— 4,39	88	18 VI 17 ³⁰	+ 0,15	+ 0,59
33	12 XI 14 ⁰⁵	— 0,04	— 1,93	89	19 VI 6 ⁴⁵	+ 0,11	+ 0,80
34	14 XI 14 ³⁵	— 0,23	— 7,39	90	20 VI 11 ³⁰	+ 0,11	+ 2,09
35	17 XI 11 ⁵⁵	— 0,48	+ 9,70	91	23 VI 11 ³⁰	+ 0,11	+ 2,09
36	18 XI 14 ³⁵	— 0,23	— 7,39	92	27 VI 10 ³⁰	— 0,13	+ 2,77
37	19 XI 14 ⁵⁰	+ 0,06	+ 4,25	93	28 VI 15 ¹⁰	— 0,02	+ 1,28
38	20 XI 14 ⁵⁵	+ 0,03	— 5,29	94	29 VI 20 ³⁵	— 0,12	+ 1,21
39	20 XI 16 ⁴⁰	+ 0,09	— 6,87	95	1 VII 9 ¹⁰	+ 0,02	+ 2,71
40	21 XI 14 ¹⁵	+ 0,02	— 1,69	96	2 VII 8 ⁰⁰	— 0,02	+ 0,31
41	25 XI 16 ⁰⁰	+ 0,81	— 8,69	97	3 VII 23 ⁴⁰	0,00	+ 0,21
42	26 XI 16 ⁰⁰	+ 0,80	— 9,99	98	5 VII 10 ³⁵	— 0,05	+ 1,08
43	27 XI 14 ⁵⁰	+ 0,68	— 12,49	99	6 VII 9 ⁰⁰	— 0,13	+ 2,05
44	28 XI 17 ⁵⁰	+ 0,16	— 3,40	100	7 VII 21 ¹⁰	+ 0,15	— 1,02
45	29 XI 13 ⁵⁰	+ 0,04	+ 0,01	101	9 VII 8 ⁴⁵	+ 0,18	+ 2,34
46	1 XII 16 ¹⁰	+ 0,02	+ 5,79	102	10 VII 11 ²⁵	— 0,18	+ 6,78
47	3 XII 15 ⁵⁰	— 0,42	+ 7,82	103	12 VII 9 ⁵⁵	+ 0,12	+ 2,22
48	5 XII 14 ³⁰	— 0,39	+ 9,86	104	14 VII 10 ⁴⁰	— 0,50	+ 6,46
49	7 XII 14 ¹⁵	+ 0,50	— 11,40	105	15 VII 10 ⁵⁵	— 0,05	+ 3,67
50	8 XII 15 ³⁰	— 0,20	— 5,25	106	16 VII 12 ⁰⁰	— 0,15	+ 3,99
1920				107	28 VII 11 ¹⁰	— 0,10	+ 4,34
51	4 II 9 ¹⁵	— 0,58	+ 7,29	108	29 VII 11 ¹⁰	0,00	+ 3,94
52	4 v 15 ³⁰	— 0,52	+ 7,84	109	30 VII 10 ⁴⁰	+ 0,10	+ 4,60
53	5 v 9 ²⁵	— 0,49	+ 13,56	110	31 VII 11 ¹⁰	+ 0,10	+ 0,17
54	5 v 17 ⁴⁰	— 0,52	+ 14,14	111	2 VIII 13 ⁴⁰	— 0,30	+ 1,76
55	6 v 18 ⁰⁰	— 0,30	+ 7,59	112	3 VIII 10 ¹⁰	— 0,12	+ 2,98

N ^{os}	DATES	Δs	Δh	N ^{os}	DATES	Δs	Δh
115	8 VIII 8 ⁵²	+ 0,05	+ 5,07	138	5 X 20 ⁴⁵	— 0,18	— 0,53
116	15 VIII 10 ⁴⁵	— 0,05	+ 2,87	139	6 X 9 ⁵⁵	— 0,16	— 1,12
117	16 VIII 9 ⁵⁵	— 0,12	+ 6,95	140	8 X 10 ¹⁰	— 0,16	+ 3,03
118	17 VIII 9 ⁵⁵	— 0,12	+ 3,95	141	9 X 9 ⁵⁵	— 0,05	+ 1,46
119	26 VIII 11 ³⁵	— 0,10	+ 4,44	142	10 X 10 ⁵⁵	+ 0,10	+ 1,82
120	28 VIII 9 ⁵⁵	— 0,30	+ 5,68	143	1 X 10 ⁴⁰	— 0,05	— 0,26
121	2 IX 9 ³⁵	— 0,13	+ 4,40	144	12 X 8 ⁴⁵	— 0,10	+ 3,15
122	3 IX 9 ⁵⁵	— 0,35	+ 3,24	145	13 X 11 ⁰⁰	+ 0,02	+ 5,52
123	6 IX 8 ⁴⁰	— 0,15	+ 4,09	146	18 X 11 ⁴⁰	+ 0,20	— 2,64
124	7 IX 10 ⁰⁵	+ 0,05	+ 3,27	147	20 X 14 ³⁵	— 0,01	+ 0,81
125	15 IX 9 ⁴⁵	— 0,11	+ 4,13	148	21 X 18 ⁰⁰	— 0,10	— 0,95
126	16 IX 10 ³⁰	— 0,30	+ 1,04	149	26 X 10 ³⁰	— 0,20	+ 6,59
127	20 IX 11 ¹⁵	+ 0,09	— 0,90	150	27 X 17 ¹⁰	— 0,40	+ 2,22
128	21 IX 9 ⁴⁵	— 0,08	+ 0,77	151	30 X 11 ⁴⁰	— 0,22	+ 1,42
129	2 IX 10 ³⁵	— 0,32	+ 4,13	152	1 XI 17 ¹⁵	+ 0,50	— 4,38
130	23 IX 10 ⁰⁰	— 0,13	+ 3,25	153	3 XI 16 ²⁰	+ 0,25	— 6,34
131	24 IX 8 ⁴⁵	— 0,15	+ 1,17	154	9 XI 14 ⁵⁵	— 0,25	+ 9,78
132	26 IX 10 ⁵⁵	— 0,18	+ 5,82	155	10 XI 9 ¹⁰	— 0,21	+ 9,13
133	27 IX 9 ⁵	— 0,28	+ 5,43	156	1 XI 10 ⁰⁰	— 0,38	+ 6,69
134	28 IX 8 ⁴⁵	— 0,30	+ 4,96	157	16 XI 17 ³⁰	— 0,20	+ 10,85
135	29 IX 8 ⁵⁵	+ 0,01	+ 1,13	158	17 XI 18 ⁵⁰	— 0,58	+ 12,88
136	2 X 9 ¹⁰	+ 0,15	— 4,30	159	13 XII 17 ⁵⁵	— 0,05	+ 1,18
137	5 X 11 ⁵⁰	— 0,20	— 0,00	160	15 XII 9 ⁵⁵	— 0,07	— 0,79

ÉTUDE DE L'AIR CAPTÉ EN AVION. — La direction de l'aérodrome fédéral a eu la grande obligeance de nous autoriser à utiliser des avions militaires pour capter de l'air à différentes altitudes. La plupart de ces prises d'air ont été faites à 2000 et 3000 m. au-dessus du lac de Neuchâtel, à quelques kilomètres au large de la ville. Nous nous sommes servi pour ces déterminations de bombes de 6-7 litres munies d'une valve, d'un manomètre et d'un robinet de détente. Ces bombes dans lesquelles

DATES	d	Δh en $\frac{m}{m}$	ALT m.	DATES	d	Δh en $\frac{m}{m}$	ALT m.
23 VI 11 ²⁰	0,00	+ 8,0	2550	16 VIII 16 ⁴⁵	+ 0,13	+ 5,2	1000
29 VI 11 ¹⁵	— 0,10	+ 1,0	2400	6 IX 16 ¹⁰	+ 0,10	+ 3,5	1800
7 VII 7 ³⁰	— 0,10	0,0	2600	6 IX 17 ³⁰	+ 0,03	+ 3,2	1200
7 VII 11 ¹⁵	— 0,27	— 0,5	3200	28 IX 12 ⁴⁰	+ 0,31	+ 5,0	2300
29 VII 6 ⁵⁵	+ 0,06	+ 4,0	2000	28 IX 15 ¹⁰	+ 0,15	+ 4,8	1100
29 VII 7 ¹⁵	+ 0,12	+ 4,0	1200	21 X 13 ¹⁵	— 0,02	0,0	3000
7 VIII 7 ³⁰	+ 0,12	+ 3,0	3800	22 II 12 ³⁰	+ 0,24	+ 6,5	2500
7 VIII 6 ³⁰	0,00	+ 3,5	2500	22 II 13 ¹⁵	+ 0,10	+ 6,5	3400
16 VIII 16 ¹⁰	+ 0,35	+ 5,5	2300				

nous avons réduit la pression à 2-3 cm. Hg étaient remplies au moyen d'une pompe graissée à la glycérine à 2,5 atm. environ. Le tuyau d'arrivée de l'air était fixé au train d'atterrissage de l'avion; de cette façon, nous étions sûrs de capter de l'air pur non mélangé à des vapeurs de benzine ou à des gaz brûlés sortant du moteur.

Nous avons constaté au début que la densité de l'air contenu dans les bombes diminuait de 4-5 dixièmes de mgr. par 24 heures. Il était naturel d'admettre que cette variation provenait d'une diminution de la teneur en oxygène par suite de l'oxydation de la bombe. Nous l'avons alors protégée en y faisant fondre de la paraffine que nous

avons laissé refroidir en agitant la bombe. Une couche mince de paraffine se déposait sur les parois et nous avons constaté ensuite que l'air contenu dans les bombes ainsi préparées ne subissait aucune variation de densité, aux erreurs d'observations près, soit à quelques cent-millièmes. Le tableau 2 résume nos résultats; quelques-uns sont transcrits sur les graphiques de la *fig. 3* (point marqué A). Les valeurs de d sont les différences en mgr. entre la densité de l'air capté en avion et celle de l'air à Neuchâtel au moment de la prise d'air.

Les points représentant la densité de l'air capté à 2000 et 3000 mètres sont toujours dans le voisinage de la courbe exprimant les variations de densité au niveau du sol, ce qui indique que la règle de Loomis-Morley est encore suivie à cette altitude, mais il semble que l'amplitude des variations soit plus faible qu'au niveau du sol.

Nous complétons actuellement cette étude, notamment en ce qui concerne les mesures aux grandes altitudes en captant de l'air vers 5000 mètres.

Nous exprimons ici à la direction de l'aérodrome fédéral tous nos remerciements pour les facilités qu'elle nous a accordées dans notre étude et pour l'intérêt qu'elle témoigne aux recherches scientifiques.

ÉTUDE DE LA PRÉSENCE D'UN GAZ LOURD. — Nous avons essayé d'éliminer les gaz lourds que l'air pourrait contenir en proportion variable en les liquéfiant. Nous avons placé sur la canalisation de l'appareil un tube en U rempli de perles de verre (ce tube est désigné par T, dans le schéma général, *fig. 1*) et plongeant dans un Dewar que nous avons rempli une première fois de neige carbonique et d'alcool, puis d'air liquide.

Les premières mesures ont été faites les 26 et 27 novembre 1920 et sont représentées sur le graphique de la *fig. 3*. Les points expérimentaux correspondants diffèrent entre eux de plusieurs dixièmes de mgr.; ceci provient de ce que la pression atmosphérique variait brusquement, ce qui diminue la précision des mesures. On voit néanmoins que ces points ne sont pas au-dessous de la courbe exprimant la densité de l'air.

Enfin, après avoir laissé la neige carbonique dans le Dewar pendant 48 heures, nous l'avons retirée en observant les déplacements de la position d'équilibre de la balance; mais nous n'avons constaté que les variations dues aux mauvaises conditions de pression. La mesure de densité faite une demi-heure plus tard (27 x 20 à 23 h. ³⁰) n'accuse aucune augmentation de densité, ce qui aurait été le cas si des gaz plus lourds que l'air avaient été retenus par la neige carbonique. Comme la température de la neige carbonique pouvait n'être pas suffisamment basse, nous avons répété la même opération en remplissant le Dewar d'air liquide. Les mesures ont été faites les 15 et 16 décembre 1920 et sont également reportées sur les graphiques du § X. (Points marqués AI.). On constate immédiatement que la présence de l'air liquide n'a apporté aucune variation de densité de l'air. L'augmentation qui aurait dû se produire dans le cas de la présence de gaz condensés lorsque nous avons enlevé le Dewar, après l'avoir laissé pendant 48 heures (mesure du 16 xii 20 à 18 h. ⁵⁵) n'a pas été constatée.

Nous avons complété ces recherches en étudiant l'air capté dans une grotte ainsi que l'air extrait de l'intérieur du sol.

Pour la première étude nous nous sommes servis des bombes déjà décrites. Nous les avons remplies à l'intérieur de la grotte de Ver (gorges de l'Areuse), à trente mètres environ de l'entrée. Le fond de la grotte étant à un niveau inférieur à celui de l'entrée, les gaz lourds hypothétiques dont nous cherchions la présence auraient

dû s'y accumuler. Mais nous avons constaté des différences inférieures au dixième de milligramme entre la densité de l'air extérieur et celui de la grotte.

Pour étudier l'air du sol, nous avons prolongé la canalisation de notre appareil jusque dans une cavité creusée à un mètre environ de profondeur dans le terrain de remplissage avoisinant l'Université. Deux robinets permettaient de capter indifféremment l'air extérieur ou l'air du sol. Nous avons exécuté ces mesures en les alternant et constaté que la densité de l'air capté dans le sol est toujours très voisine de celle de l'air extérieur; elle est en général plus faible de 2-3 dixièmes de milligramme, ce qui pourrait s'expliquer par une diminution de la teneur en oxygène.

PRÉSENCE D'UN GAZ LÉGER. — Nous avons vu, au chapitre II, que si l'hypothèse émise par Loomis pour expliquer les variations de densité de l'air est exacte, il faut admettre, puisque les variations de la teneur de l'air en tous ses composants connus ne sont pas suffisantes pour rendre compte des variations de densité observées, que les courants descendants qui se produisent au centre des régimes de pression anticycloniques entraînent avec eux un gaz encore inconnu. Cette question a été étudiée par nous et les recherches effectuées semblent résoudre négativement le problème : nous avons employé l'analyse spectrale pour étudier les gaz légers extraits de l'air atmosphérique par diffusion à travers les parois d'une ampoule de silice, ainsi que des résidus de liquéfaction de l'air, mis obligeamment à notre disposition par M. George Claude et contenant essentiellement de l'hélium et du néon.

Nous n'avons constaté l'existence d'aucun gaz nouveau (*Voir note 15 de l'Index bibliographique*).

DÉPOUSSIÉRAGE DE L'AIR. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE ET MISE AU POINT DES APPAREILS. — Nous avons cherché à dépoussiérer l'air en l'ionisant et en le faisant passer dans un champ électrique qui devait happer les ions ainsi formés, éventuellement collés aux poussières. Ce procédé est employé dans l'industrie et donne de très bons résultats, pour débarrasser l'air des fumées ou des poussières entraînées.

L'air à étudier passe dans un cylindre de laiton de 40 cm. de long et de 20 mm. de diamètre, recouvert intérieurement d'une couche de gélatine; l'axe du cylindre est constitué par un fil de nickel enduit de gélatine, de trois dixièmes de mm. de diamètre, isolé aux extrémités du cylindre sur des bouchons de soufre. Le fil de nickel est relié au pôle négatif d'une machine statique, tandis que l'autre pôle, ainsi que le cylindre de laiton sont mis en communication avec le sol. L'effluve, éclatant entre le fil de nickel et le cylindre, ionise l'air; le champ électrique créé par l'ionisateur lui-même, doit débarrasser l'air des ions et des poussières.

Il fallait nécessairement détruire l'ozone formé par l'effluve, ce que nous avons réalisé en chauffant le courant d'air dans un four électrique, l'ozone étant instable à haute température.

Avant de monter le dépoussiéreur sur la canalisation de notre appareil, nous avons procédé à des essais préliminaires en aspirant, au moyen d'une trompe à eau, de l'air chargé artificiellement de poussières et en le faisant passer au travers du dépoussiéreur et du four. Une petite cuve munie de deux fenêtres permettait d'observer le passage des poussières. Un flacon laveur placé sur la canalisation, qu'on pouvait ainsi facilement ouvrir, permettait de reconnaître à son odeur la présence de l'ozone (Sensibilité : 1 millionième).

Un second flacon laveur permettait de comparer le débit à celui de notre appareil de mesure. Nous avons introduit de la fumée de tabac par l'orifice d'aspiration et nous avons mesuré le temps que mettaient ces fumées pour parvenir dans la chambre

d'observation. Le débit étant de 8-9 litres à l'heure, il fallait 60 secondes environ pour que les premières traces de fumée apparaissent. Nous avons répété cette mesure plusieurs fois et mis ensuite la machine électrique en action. Nous avons constaté que toute la fumée introduite dans le dépoussiéreur était absorbée; aucune trace n'apparaissait dans la chambre d'observation. Quant au four, nous l'avons chauffé progressivement tout en débouchant de temps en temps le flacon laveur. L'odeur d'ozone, très forte au début, faiblissait rapidement lorsque la température montait, pour disparaître complètement à une température voisine de 400°.

Dans notre appareil définitif, nous avons chauffé le four au rouge naissant pour être sûrs de détruire complètement l'ozone. Nous l'avons intercalé entre les robinets numérotés III et IV dans le schéma général de l'appareil (*fig. 1*). Nous avons remplacé le tube de verre traversant le four par un tube de porcelaine raccordé à la tuyauterie de verre par des joints à la litharge.

Lors des premiers essais, le four destiné à détruire l'ozone était placé avant les flacons laveurs et les tubes desséchants. Une trentaine de mesures exécutées dans ces conditions ont montré une diminution de la densité de l'air, variant de 2 à 6 dixièmes de mgr. Mais nous avons constaté que sous la seule action du four chauffé cette diminution se produisait également. Par contre en desséchant l'air et en le privant de CO_2 avant de le conduire dans le four, sa densité restait constante. L'appareil définitif a été établi en tenant compte de cette constatation. Il n'en reste pas moins vrai que le dépoussiérage de l'air par la méthode que nous venons de décrire est assez délicat. Nous avons été arrêtés par des difficultés inattendues encore incomplètement résolues; aussi ne pouvons-nous apporter aucun résultat positif et nous bornons-nous à l'indication de la méthode employée que nous chercherons à perfectionner.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1. — Nos recherches ont montré d'une façon tout à fait probante que les variations de la densité de l'air dans nos régions suivent la règle de Loomis-Morley. L'amplitude de ces variations ne dépasse généralement pas 5-6 dixièmes de mgr. Nous avons constaté une seule fois un écart de 0,8 mgr. avec la moyenne (25-26 x₁ 1920).

2. — Les quelques mesures de densité de l'air capté entre 2000 et 5000 m. d'altitude, en avion, ont montré que la règle de Loomis-Morley est encore suivie à ces altitudes, mais il semble que l'amplitude des variations soit plus faible qu'au niveau du sol.

Cette étude est poursuivie spécialement en ce qui concerne les grandes altitudes.

3. — Nos recherches semblent prouver également que l'hypothèse expliquant les variations de densité de l'air par la présence de gaz lourds, doit être rejetée.

4. — Des travaux antérieurs (15) semblent indiquer qu'aucun gaz inconnu n'est amené des régions supérieures de l'atmosphère au niveau du sol par les courants descendants des régimes de pression anticycloniques.

5. — A défaut d'autres hypothèses, celle de M. Ph.-A. Guye, attribuant les variations de densité de l'air à la présence de poussières ultra-microscopiques, semble rester en cause. L'étude que nous avons entreprise pour la vérifier n'est pas encore achevée. Les essais préliminaires et la mise au point assez délicate des appareils sont terminés et nous nous proposons de continuer ces recherches.

BIBLIOGRAPHIE

1. — Results derived from an examination of the United States Weather Maps for 1872 and 1873, LOOMIS, *Am. Journal Sc.* (3), t. 9, 1875, p. 1.
2. — Possible cause of variation of the proportion of oxygen in the air, MORLEY, *Am. Journal Sc.* (3), t. 18, 1879, p. 168.
3. — On a possible cause of the variations observed in the amount of oxygen in the air, MORLEY, *Am. Journal Sc.* (3), t. 22, p. 147; *Am. Chem. Journal*, t. 3, 1882, p. 275.
4. — On the Densities of the principal Gases, LORD RAYLEIGH, *Proc. Roy. Soc. London*, t. 53, 1893, p. 134; *Scientific Papers*, t. 4, 1903, p. 47; *Chem. News*, t. 67, 1893, p. 183, 198, 211.
5. — Application du principe d'Archimède à la détermination exacte des densités gazeuses, A. JAQUEROD et TOURPAÏAN, *Archives des Sciences physiques et naturelles*, t. 31, 1911, p. 20.
6. — La densité et la composition de l'air, Ph.-A. GUYE, *Archives des Sciences physiques et naturelles*, t. 34, 1912, p. 451.
7. — Poids du litre normal d'air atmosphérique à Genève, Ph.-A. GUYE, J. KOVACS, E. WOURTZEL, *Journal de Chimie physique*, t. 10, 1912, p. 332.
8. — The Composition of the Atmosphere, FRANCIS-G. BENEDICT, 1912, Washington, D. C., Published by the Carnegie Institution of Washington.
9. — Révision de la densité de l'oxygène. Contribution à la détermination de la densité de l'air à Genève, GERMANN, *Journal de Chimie physique*, t. 12, 1914, p. 66.
10. — Sur les variations de la densité de l'air, GERMANN et BOOTH, Western Reserve. *University Bulletin*, t. 19, 1916, p. 45.
11. — Méthode micro-analytique pour l'étude des gaz; application à l'analyse des traces d'air, Ph.-A. GUYE et GERMANN, *Journal de Chimie physique*, t. 14, 1916, p. 195 et C. R., t. 159, 1914, p. 225.
12. — Sur les variations de la densité de l'air et la loi de Loomis-Morley, Ph.-A. GUYE, *Journal de Chimie physique*, t. 15, 1917, p. 561.
13. — La masse du litre d'air dans les conditions normales, M. LEDUC, *Travaux du B. I. des P. et M.*, t. 16, 1917, p. 7.
14. — La précipitation électrique des fumées et des poussières, F. MICHEL, *Revue générale des Sciences*, t. 29, 1918, p. 456-468.
15. — Sur un constituant inconnu de l'air atmosphérique, A. JAQUEROD et CH. BOREL, *Archives des Sciences physiques et naturelles*, 1920, p. 265.
16. — De l'action de la pesanteur sur les mélanges gazeux, notamment de l'atmosphère terrestre, GOUY, *Comptes rendus Acad. Paris*, t. 158, p. 664 (1914).

